



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A**  
**ROBOTIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND  
ROBOTICS

## **MĚŘENÍ VIBRACÍ NA OBRÁBĚCÍCH STROJÍCH**

MEASUREMENT OF VIBRATION IN MACHINE TOOLS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**MATÚŠ HELIENEK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. JAN VETIŠKA, Ph.D.**

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Matúš Helienek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Měření vibrací na obráběcích strojích**

v anglickém jazyce:

### **Measurement of vibration in machine tools**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kmitání obráběcích strojů je stále studováno mnoha výzkumnými týmy, protože výrazným způsobem ovlivňuje produktivitu těchto zařízení.

Tato práce se bude zabývat kmitáním obráběcích strojů a možnostmi měření těchto kmitů.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše kmitání obráběcích strojů
- rešerše možnosti měření kmitání obráběcích strojů
- sestavení měřicí aparatury
- zpracování naměřených výsledků

Seznam odborné literatury:

1. Marek J, Novotný L, Smolík J, Blecha P, Březina T, Mrkvica I, Sulitka M, et al. (2010). Konstrukce CNC obráběcích strojů (MM Speciál., p. 420). Praha: MM publishing, s.r. o.
2. J. Tlustý, Manufacturing processes and equipment. Prentice-Hall, Inc., 1999, p. 928.
3. Weck Manfred, & Brecher Christian. (2006). Werkzeugmaschinen Konstruktion und Berechnung (p. 585). Berlin: Springer-Verlag Berlin.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Vetiška, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 14.11.2013

L.S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## ABSTRAKT

Obsah tejto práce je zameraný na všeobecný úvod do vibrodiagnostiky, počínajúc definovaním a rozdelením vibrácií. Ďalej práca opisuje teóriu získavania údajov o intenzite vibrácií. Táto časť zahrňuje aj typy snímačov, ktorými meriame vibrácie. Praktická časť sa zaoberá meraním a vyhodnotením samotného priebehu obrábania.

## ABSTRACT

This thesis contains general introduction to vibrodiagnostics starting with definition and classification of vibrations. Furthermore the thesis describes the theory of data acquisition of vibration intensity. This section includes also types of sensors, which are used for vibration measuring. Practical part deals with measurement as well as evaluation of cutting process.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

Vibrácie, meranie vibrácií

## KEY WORDS

Vibration, measurement of vibration

## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

HELIENEK, M. *Měření vibrací na obráběcích strojích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Vetiška, Ph.D..

## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „Měření vibrací na obráběcích strojích“ vypracoval samostatne pod vedením Ing. Jana Vetišky, Ph.D. s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý je uvedený na konci tejto práce.

V Brne, 26. mája 2014

.....

Matúš Helienek

## POĎAKOVANIE

Týmto chcem poďakovať Ing. Janovi Vetiškovi, Ph.D. za ochotný a priateľský prístup, všetky jeho návrhy, rady a pripomienky, ktoré mi poskytol počas vypracovávania tejto práce. Ďalej by som rád poďakoval mojej priateľke za úžasnú podporu, trpezlivosť a estetické cítenie, ktoré vyformovalo túto prácu do finálnej podoby a ostatným, ktorí iným ale rovnako dôležitým spôsobom prispeli k tvorbe tejto práce.



## OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD .....</b>                            | <b>11</b> |
| <b>1 KMITANIE .....</b>                      | <b>12</b> |
| 1.1 POJEM KMITANIE PRI OBRÁBANÍ .....        | 12        |
| 1.2 DEFINÍCIA KMITANIA .....                 | 12        |
| 1.3 TYPY KMITANIA .....                      | 12        |
| 1.3.1 VOĽNÉ KMITANIE .....                   | 12        |
| 1.3.2 VYNÚTENÉ KMITANIE .....                | 13        |
| 1.3.3 SAMOBUDENÉ KMITANIE .....              | 14        |
| <b>2 ROZBOR MERANIA .....</b>                | <b>16</b> |
| 2.1 VYŠETROVANÉ VELIČINY .....               | 16        |
| 2.2 TYPY AKCELEROMETRICKÝCH SNÍMAČOV .....   | 18        |
| 2.2.1 KAPACITNÉ SNÍMAČE .....                | 18        |
| 2.2.2 INDUKČNÉ SNÍMAČE .....                 | 18        |
| 2.2.3 PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE .....          | 19        |
| 2.2.4 PIEZOREZISTÍVNE SNÍMAČE .....          | 20        |
| 2.2.5 OPTICKÉ SNÍMAČE .....                  | 20        |
| 2.3 UPEVNENIE AKCELEROMETROV .....           | 21        |
| <b>3 MERANIE VIBRÁCIÍ PRI OBRÁBANÍ .....</b> | <b>22</b> |
| 3.1 CIELE MERANIA VIBRÁCIÍ .....             | 22        |
| 3.2 OBJEKT ZVOLENÝ PRE EXPERIMENT .....      | 22        |
| 3.3 PROSTRIEDKY NA ZISK ÚDAJOV .....         | 22        |
| 3.3.1 AKCELEROMETER KISTLER 8636C10 .....    | 23        |
| 3.3.2 ZBERNÝ MODUL NI 9234 .....             | 23        |
| 3.3.3 SOFTWARE NI LabVIEW SignalExpress..... | 24        |
| 3.4 SPRACOVANIE ZÍSKANÝCH INFORMÁCIÍ .....   | 24        |
| <b>ZÁVER .....</b>                           | <b>29</b> |
| <b>POUŽITÁ LITERATÚRA .....</b>              | <b>30</b> |
| <b>PRÍLOHA – UKÁŽKY ĎALŠÍCH MERANÍ.....</b>  | <b>32</b> |



## ÚVOD

Obrábanie patrí v súčasnosti k neodmysliteľným procesom spracovávaní materiálu. V našom záujme je, aby sme pri výrobe dosahovali len tú najvyššiu produktivitu zaobstaranú vysokou presnosťou a kvalitným povrchom. To je hlavný dôvod, prečo muselo obrábanie prejsť dlhoročným vývojom, aby sa vypracovalo do dnešnej podoby.

Proti tomuto vývoju však stálo niekoľko nežiaducich faktorov, ktoré bolo najsť potrebné správne definovať. Jedným z nich je vibrácia alebo kmitanie obrábacích strojov, ktoré vzniká pri obrábaní materiálu a často je označované za najväčší problém pri ďalšom zdokonaľovaní obrábacieho procesu. V minulom storočí sa týmto problémom zaoberalo mnoho vedcov a úspešne dokázali určiť a vyhodnotiť príčinu neželaného chvenia. Ich zásluhou boli objavené rôzne fyzikálne zákonitosti a praktické postupy zisťovania vibrácií, ktoré využívame dodnes.

Analýzou kmitania sa zaoberá vibrodiagnostika. Tento odbor využíva rôzne snímače a špecializovaný software k získaniu potrebných informácií o stave obrábacieho stroja. Jej úlohou je zistiť mieru poškodenia súčiastok, možné mechanické uvoľnenie či v neposlednom rade geometrické vychýlenie alebo nesúososť ložísk, spojok a prevodov. Aby nedošlo k poškodeniu ďalších častí obrábacieho stroja alebo k ohrozeniu obsluhujúceho personálu, musia sa vykonávať pravidelné periodické merania.

Vibrodiagnostika má dnes významné postavenie medzi technickými odbormi zameranými na obrábanie materiálu a je predmetom skúmania niekoľkých výskumných stredísk. Účelom tejto práce je preto podať čitateľovi základné informácie, ktoré zahŕňujú poznatky o vibráciách, ich rozdelenie a moderný spôsob získania či posúdenia nameranej intenzity vibrácií. Všetky tieto znalosti sa vo veľkej miere využívajú nielen pri testovaní stability, ale aj pri navrhovaní výkonnejších obrábacích centier. Práve namerané údaje o vznikajúcom chvení sú kľúčové pri riešení počítačových simulácií, ktoré ich po importe do pripraveného modelu použijú pri výpočtoch zaťažovacích testov.

# 1 KMITANIE

## 1.1 POJEM KMITANIE PRI OBRÁBANÍ

K tomu, aby sme dosiahli pri výrobe obrábacím procesom vyššiu produktivitu, je potrebné zaistiť vyšší odber materiálu za jednotku času, vyššie rezacie otáčky a hlbší rez do materiálu. Neustále zvyšovanie týchto parametrov ale spôsobí, že pri určitých hodnotách sa začne prejavovať vplyv vibrácií, čo má za následok zníženie rezacej presnosti, nižšiu kvalitu povrchu, skrátenie životnosti rezného nástroja a v najhoršom prípade hrozí aj riziko poškodenia vretena stroja. Vibrácie teda nepriaznivo prispievajú ku kvalite priebehu celého obrábacieho procesu a našou snahou je ich čo najviac utlmiť i v záujme ochrany častí obrábacieho stroja voči dynamickému namáhaniu. Existujú ale i prípady, kedy sa kmitanie zámerne vyvoláva za účelom zvýšenia rezacích schopností nástroja [2], [3], [5].

## 1.2 DEFINÍCIA KMITANIA

Kmitanie (vibrácia alebo oscilácia) ako pojem je mechanický pohyb hmotného bodu, ktorý v čase striedavo naberá opakujúce sa hodnoty okolo svojej rovnovážnej polohy. Veľkosti odchýlok kmitov počas priebehu kmitania neprekračuje rozsah určitého intervalu hodnôt [3], [4].

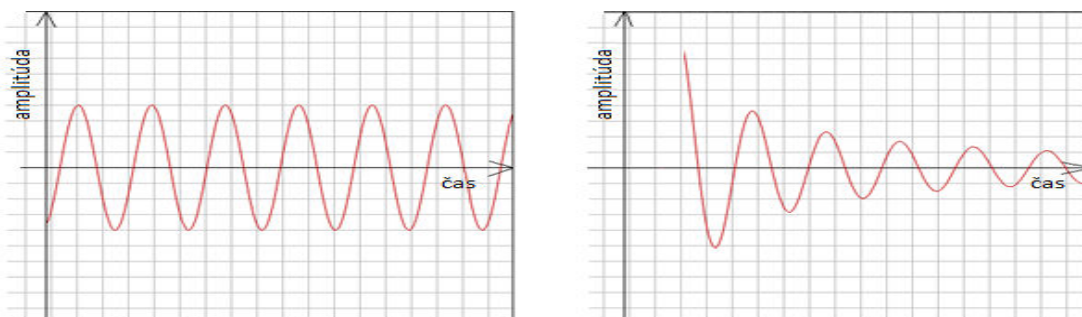
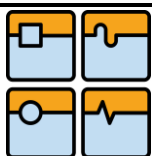
## 1.3 TYPY KMITANIA

Zdroje [1], [6] uvádzajú výskyt rôznych typov kmitaní. Pre správne posúdenie nebezpečenstva, sú definované tri základné typy a to *voľné*, s najmenším rizikom a snahou o bližšie skúmanie; *vynútené* a *samobudené*, pri ktorých už je snaha o elimináciu z dôvodu nepriaznivých účinkov viac opodstatnená.

### 1.3.1 VOLNÉ KMITANIE

Pre voľné kmitanie je charakteristické krátke trvanie a pomerne rýchlo klesajúci účinok. Bez vplyvu ďalších síl energia pohybu časom zaniká. Preto vo väčšine prípadov jeho vplyv môžeme zanedbať. Vzniká napr. pri uvedení stroja do obehu, záberu nástroja do materiálu [1], [4].

Najlepší spôsob ako charakterizovať priebeh voľného kmitania vedie cez jeho nahradenie sústavou zlozenej zo závažia zachytenom na pružine a uvedenie do pohybu. Vplyvom direktívnej sily od pružiny získame netlmené voľné kmitanie, ktoré od vychýlenia z rovnovážnej polohy nekoná žiadne ďalšie zmeny prebiehajúce v čase – amplitúda kmitov je po celý priebeh kmitania konštantná (Obr. 1a). Tento typ je však len teoretický, pretože v praxi sa stretávame s tlmeným kmitaním, ktoré nahradzujeme rovnakou sústavou s pridaním tlmiča. Ten reprezentuje disipatívnu silu, ktorá postupne znižuje amplitúdu kmitania (Obr. 1b) [1], [4], [5].



Obr. 1 vľavo a) netlmené kmitanie a jeho periodický priebeh, vpravo b) tlmené kmitanie so znižujúcou sa amplitúdou

Za predpokladu, že do našej sústavy nezasahujú vonkajšie sily, môžeme podľa [1] priebeh kmitania vyjadriť pomocou diferenciálnej pohybovej rovnice:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

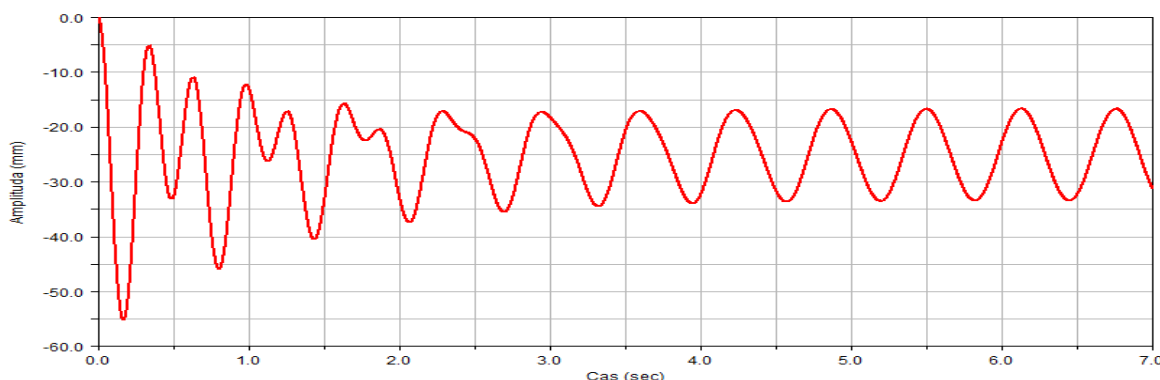
kde  $m$  je hmotnosť telesa,  $c$  je koeficient tlmenia,  $k$  je tuhosť pružiny,  $\ddot{x}$  je zrýchlenie telesa,  $\dot{x}$  je rýchlosť telesa a  $x$  je dráha.

### 1.3.2 VYNÚTENE KMITANIE

Aby si naša sústava, ktorá vykonáva voľné kmitanie, zachovala energiu pohybu, musí na ňu začať pôsobiť vonkajšia sila. Táto budiaca sila je periodická, závislá na čase a má odlišnú frekvenciu pôsobenia ako sústava. Po určitom čase sa rozdiel týchto frekvencií zmenší na toľko, že frekvencia voľného kmitania sa prispôsobí frekvencii budiacej sily a vyrovnajú sa. Tento jav sa nazýva rezonancia. Kmity, ktoré dosahujú maximálnu odchýlku, sú rezonančné kmity. Ich amplitúda ustáleného vynúteného kmitania je potom závislá od oboch frekvencií – frekvencie voľného kmitania a budiacej sily (Obr. 2) [4], [6]. Časová závislosť budiacej sily má podľa [1] nasledujúci tvar:

$$F = F_0 \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

kde  $F_0$  je amplitúda budiacej sily,  $t$  je čas a  $f$  je frekvencia budiacej sily.



Obr. 2 – Priebeh zmeny frekvencie voľného kmitania na vynútené kmitanie s frekvenciou budiacej sily v ustálenom stave [5]

Príčin, ktoré vyvolávajú tento druh kmitania, je podľa [3] a [6] niekoľko:

- rotácia asymetrických útvarov alebo iných častí strojov, ktoré nie sú vhodne vyvážené (napr. obrobok, hriadeľ s drážkou, spojky, ozubené kolesá)
- zmena prierezu triesky počas vykonávania obrábacieho procesu
- vynútené kmitanie vzniká aj keď stroj beží naprázdno
- zotrvačné sily prvkov, ktoré konajú priamočiary alebo kruhový vratný pohyb
- nepresnosti prevodových mechanizmov a pod.

Podľa [6] sa dá v uvedených prípadoch čiastočne alebo úplne zabrániť vzniku vynúteného kmitania:

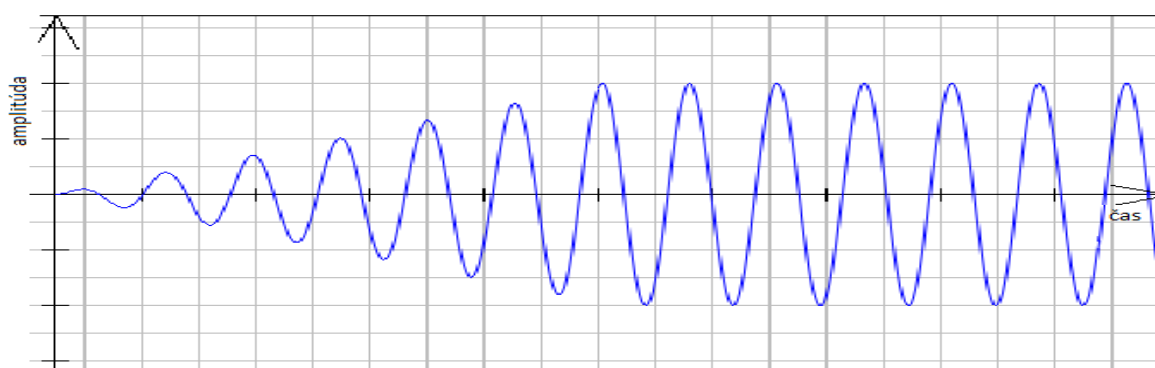
- dynamické vyváženie rotujúcich častí na špeciálnych strojoch
- zdokonalenie výroby ozubených kôľ a valivých ložísk
- použitie torzného tlmiča pri frézovaní, prípadne frézovacej hlavy s nerovnomerným rozložením nožov a pod.

### 1.3.3 SAMOBUDENÉ KMITANIE

Spolu s vynúteným kmitaním najviac spôsobuje nepriaznivé účinky. Ich škodlivosť sa prejavuje pri všetkých typoch obrábania materiálu a to nadmerným zaťažením stroja a zhoršením kvality výsledného povrchu. Na rozdiel od vynúteného kmitania, ktoré vyvoláva budiaca sila, samobudené kmitanie vzniká pôsobením rezania, reznou silou [3], [5].

Zdroj [1] opisuje charakteristické vlastnosti tohto kmitania cez:

- rastúcu amplitúdu kmitov, ktorá sa po istom čase ustáli na konštantnej hodnote (Obr. 3)
- frekvenciu vibrácií, ktorá je zhodná alebo blízka frekvenciám sústavy s voľným kmitaním
- nezávislosťou od vonkajšej periodickej sily
- stabilný zdroj energie, z ktorého sústava vibráciami čerpá periodickú silu a prekonáva straty vznikajúce tlmením [6].



Obr. 3 – Ustálenie amplitúdy kmitov samobudeného kmitania na konštantnej hodnote závislej od vstupných parametrov.

Podľa [3] rozlišujeme 2 typy samobudeného kmitania a to:

- a) *skoroharmonické* – pri obrábaní sa vyskytujú najčastejšie, prejavujú sa vlnitosťou opracovaného povrchu a hlukom. Kmity vyvoláva rezná sila;

*b) relaxačné* – vyskytujú sa na obrábacích strojoch, ktoré pracujú s veľmi malými rýchlosťami posuvu.

Existujú viaceré štúdie, podľa ktorých sa určuje príčina vzniku samobudeného kmitania. Najviac sú však teoreticky i experimentálne prepracované nasledujúce teórie [6]:

- vlnitosť obrobeného povrchu – reprodukčný princíp
- smer reznej sily nesúhlasí so smerom maximálnej väzby – princíp polohovej väzby

Obe tieto teórie sú dôkladne popísané v [6].

Veľkosť samobudeného kmitania nie je závislá od otáčok obrábacieho stroja. Objavuje sa však len v určitom rozsahu rezacích podmienok a akoukoľvek obmenou sa dá rezanie kontrolovať. Samotné nebezpečenstvo výskytu samobudeného kmitania môžeme znížiť nasledovne [6]:

- zmenšenie hĺbky rezu alebo počtu súčasne rezajúcich ostrí,
- zníženie trenia medzi nástrojom a obrábaným materiálom a to menšou drsnosťou reznej plochy nástroja alebo použitím kvapaliny, ktorá znižuje trenie,
- výrazne pomáha aj pevnejšie zovretie nástroja, či skrátenie jeho vysunutia.



## 2 ROZBOR MERANIA

### 2.1 VYŠETROVANÉ VELIČINY

Priebeh vibrácií sa vyhodnocuje na základe troch základných parametrov, ktoré v závislosti na čase postupne vznikajú a zanikajú a podľa [7], [11], [12] sú to:

#### Odchýlka

Odchýlka  $x$  predstavuje zmenu vzdialenosti toho istého bodu medzi počiatočnou a okamžitou polohou, ktorá sa v priebehu obrábania periodicky mení. Okamžité hodnoty odchýlky sú teda závislé na čase. Vysoké hodnoty odchýlok indikujú nevyváženosť rotujúcich častí [7], [11]. Podľa [1] je hodnota okamžitej odchýlky vyjadrená rovnicou (3).

$$x = x_0 e^{-\lambda t} \cos(2\pi f_d t + \varphi) \quad (3)$$

kde  $x_0$  reprezentuje počiatočnú polohu, od ktorej okamžitú odchýlku počítame,  $\lambda$  je materiálová charakteristika,  $t$  je čas,  $\varphi$  je fázový posuv a  $f_d$  je frekvencia kmitania.

#### Rýchlosť

Rýchlosť  $v$  je matematicky definovaná ako prvá derivácia odchýlky. Rýchlosť vibrácií ovplyvňuje rýchlosť s akou sa mení hodnota odchýlky. Je to vektorová veličina spolu so zrýchlením [7].

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

#### Zrýchlenie

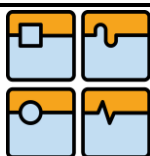
Zrýchlenie  $a$  sa meria pomocou rôznych typov akcelerometrov. Matematicky sa vyjadruje prvou deriváciou rýchlosti alebo druhou deriváciou odchýlky. So zrýchlením pri meraní súvisí aj veľkosť pôsobiacich dynamických síl, ktoré sú vyjadrené druhým Newtonovým zákonom [7], [8].

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (5)$$

II. Newtonov pohybový zákon:

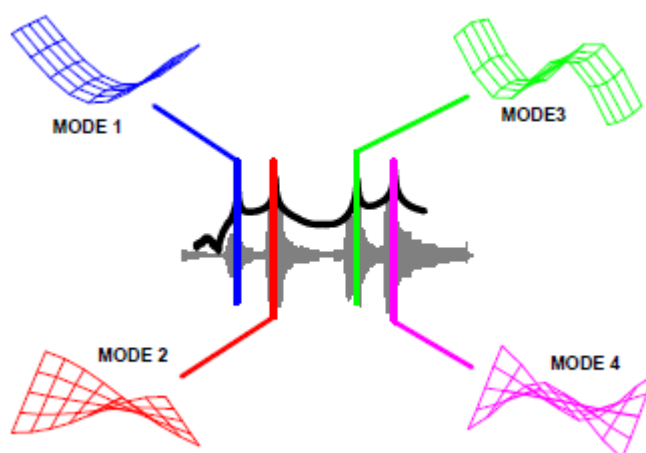
$$F = m \cdot a \quad (6)$$





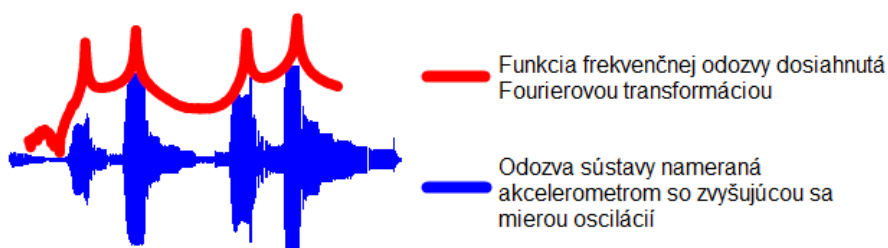
Na meranie vibrácií sa v súčasnosti najviac využívajú akcelerometre (snímače zrýchlenia) a to pre ich menšiu veľkosť oproti snímačom rýchlosti a schopnosť merať v širšom rozsahu frekvencií, čo je hlavný predpoklad väčšej použiteľnosti moderných prístrojov. Táto možnosť predstavuje rozpoznávanie širšieho rozpätia vibrácií. Ďalšou výhodou je aj fakt, že akcelerometre dokážu integráciou jednoducho konvertovať získaný údaj o okamžitom zrýchlení na príslušnú rýchlosť a odchýlku [11], [12].

Rovnako dôležité ako zistenie časového priebehu týchto troch spomínaných veličín je aj vyhodnotenie frekvencie chvenia. Mechanické chvenie je v skutočnosti veľmi komplikovaný dej a aby bolo možné ho správne posúdiť, je nutné ho rozložiť modálnou (kmitočtovou) analýzou na jednoduché zložky (tzv. módy, obr. 4). Zhotovením závislosti frekvencie na čase je možné získať amplitúdy chvenia, čím sa zároveň docieli zisk potrebných údajov k rozboru zloženého chvenia. Úlohou tejto analýzy je teda odhalenie zdroja a príčiny vibrácií. [11], [17], [18].



Obr. 4 – Rozklad zložitého chvenia na 4 základné jednoduché zložky [17].

Frekvenciu na rozdiel od priamo nameraných vyšetrovaných veličín získavame Fourierovou transformáciou z iných nameraných hodnôt (obr. 5). Miesto výskytu amplitúd frekvencie je zhodné s rezonančnou frekvenciou sústavy. [17]



Obr. 5 – Odlišnosť časového záznamu oscilácií a frekvencie. Odozvou sa rozumie veličina (odchýlka, rýchlosť alebo zrýchlenie) vyvolaná pôsobením sily [17].

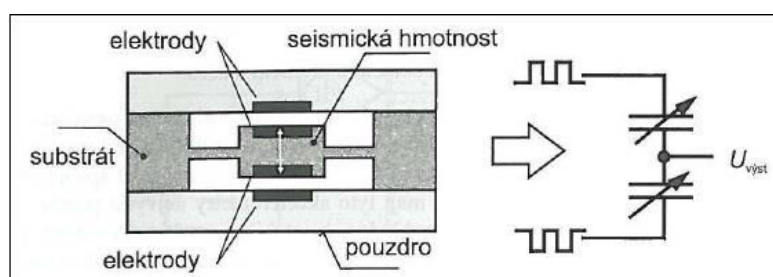
## 2.2 TYPY AKCELEROMETRICKÝCH SNÍMAČOV

K tomu, aby sme vedeli správne vyhodnotiť rôzne parametre vibrácií, je nutné použiť vhodný druh snímača. Existuje viacero typov snímačov, ktoré využívajú rôzne fyzikálne princípy. Vo všeobecnosti sa všetky snažia previesť určitý podnet na elektrický signál, ktorý sa musí následne správne spracovať. Ako je vysvetlené v [7] a [10], snímače môžeme rozdeliť do skupín podľa dvoch základných kritérií:

- a) Rozdelenie podľa umiestnenia bodu, ku ktorému sa vykonáva meranie
  - Absolútne snímače – meranie pohybu telesa je vykonávané vzhľadom k pevnému základu
  - Relatívne snímače – meranie je vyhodnocované k zvolenému bodu, ktorý sa nachádza na obrábacom stroji
- b) Rozdelenie podľa druhu využívaného fyzikálneho princípu
  - Kapacitné snímače
  - Indukčné snímače
  - Piezoelektrické snímače
  - Piezorezistívne snímače
  - Optické snímače

### 2.2.1 KAPACITNÉ SNÍMAČE

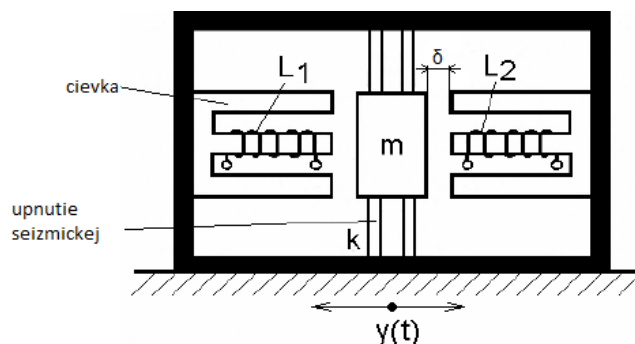
Kapacitné akcelerometre využívajú fyzikálny jav, ktorý spôsobuje zmenu kapacít dosiek kondenzátorov vyvolanú pohybom seizmickej hmotnosti. Zmena je registrovaná veľkosťou výstupného napätia, ktoré zachytáva elektróda. Kapacitné akcelerometre sú presné a citlivé, no nevhodné pre meranie vysokých rozsahov zrýchlenia [7], [8], [13].



Obr. 6 – Znážornenie kapacitného akcelerometru [13].

### 2.2.2 INDUKČNÉ SNÍMAČE

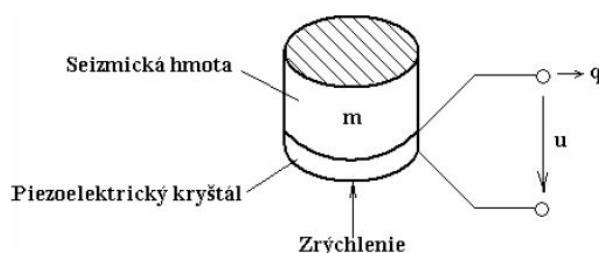
Indukčné akcelerometre pracujú na princípe pohybu seizmickej hmoty v dôsledku pôsobenia zrýchlenia. Seizmická hmota je vyrobená z feromagnetického materiálu a svojím chvením spôsobuje zmenu vzdialenosti  $\delta$ , ktorá mení hodnoty indukčnosti cievok  $L_1$  a  $L_2$ . Výsledné napätie sa rovnako ako v prípade kapacitných snímačov transformuje na zrýchlenie [8], [10].



Obr. 7 – Znážornenie indukčného snímača zrýchlenia [10].

### 2.2.3 PIEZOELEKTRICKÉ SNÍMAČE

Podstatou piezoelektriky je vzájomná interakcia medzi mechanickým a elektrickým stavom piezoelektrických kryštálov. Princíp získavania hodnôt je založený na piezoelektrickom jave, pri ktorom sa získava elektrická polarizácia snímača mechanickou deformáciou zložiek kryštalických látok. Pri opačnom piezoelektrickom jave vonkajšie elektrické pole medzi elektródami vytvára mechanické napätie deformujúce piezoelektrický kryštál [7], [9], [11].

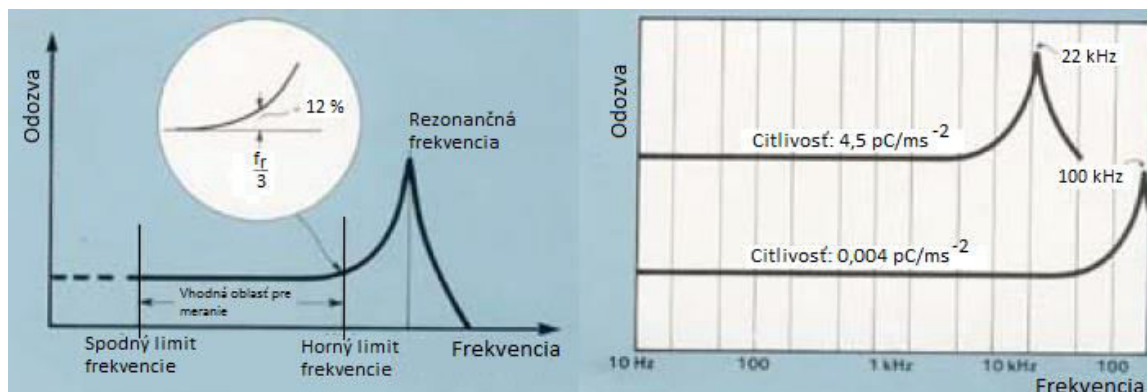


Obr. 8 – Zloženie piezoelektrického snímača [10].

Snímač je zložený z dvoch častí a to zo seizmickej hmoty, ktorá má za úlohu previesť vibrácie na silu, ktorá bude mechanicky deformovať druhú časť – piezoelektrický kryštál – za účelom vzniku náboja (napätia). Každý akcelerometer je charakterizovaný určitou nábojovou a napäťovou citlivosťou [10].

Tento typ akcelerometrov je v súčasnosti najviac využívaný pri vyšetovaní hodnôt vibrácií a to z dôvodu univerzálnosti a vyrovnanosti užitočných parametrov (rozsah meracích frekvencií, stabilita, spoľahlivosť). Je nezávislý na zdroji elektrickej energie a je schopný dopočítať integráciou výslednú rýchlosť a odchýlku. Nedokáže však merať konštantné zrýchlenie [7], [10], [11].

Rozsah pracovných frekvencií piezoelektrického akcelerometra sa pohybuje medzi hodnotami od 10 Hz do 1000 Hz pre bežné merania, ale využívajú sa často i merania do hodnoty 10 kHz. Frekvencia je závislá na hmotnosti kryštálu, pri veľmi malých rozmeroch môže frekvencia naberať hodnôt až 180 kHz, väčšie rozmery dosahujú frekvenciu približne 22 až 35 kHz [10], [11].



Obr. 9 – Zobrazenie vhodnej frekvencie pre meranie a porovnanie rôznych hodnôt nábojovej citlivosti akcelerometru [11].

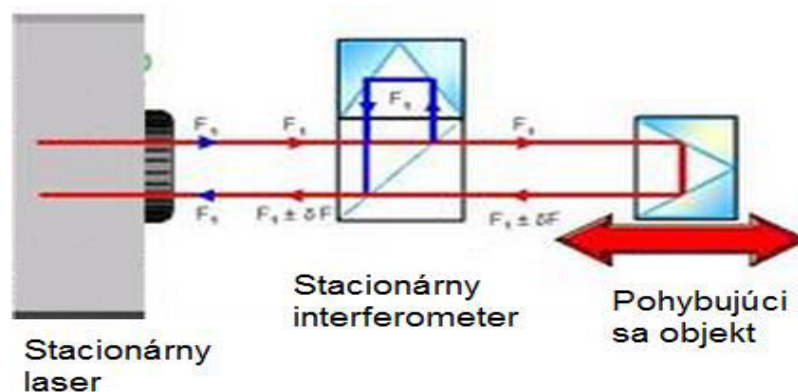
## 2.2.4 PIEZOREZISTÍVNE SNÍMAČE

Nahradením piezoelektrického kryštálu piezorezistívnym materiálom získame senzor, ktorý zaznamenáva pri budiacej sile zmenu rezistivity materiálu. V porovnaní s piezoelektrickými snímačmi, tento typ je schopný rozpoznať aj konštančné zrýchlenie, teda nulové zmeny zrýchlenia. Sú malé, spoľahlivé, presné s vysokým možným rozsahom merania, citlivé na malé zmeny zrýchlenia a vhodné pre dlhodobé testy [7], [10].

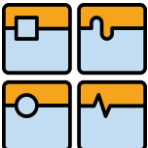
## 2.2.5 OPTICKÉ SNÍMAČE

Optické alebo laserové snímače za začínajú uplatňovať v rámci bezkontaktného merania vibrácií, kedy nespôsobujú svojou hmotnosťou odklony od skutočných hodnôt. Sú schopné merať na väčšie vzdialenosti a pri vysokých teplotách alebo pri elektromagnetickom rušení. Využívajú vyžarovanie stabilného lúča a jeho následné odrazenie pri zmene frekvencie, ktorá sa stáva hlavnou zložkou pri vyhodnocovaní uránia [10].

Príkladom optického snímača je laserový interferometer XL 80. Je schopný pracovať s vysokou presnosťou  $\pm 0,5$  ppm a to aj s kompenzáciou nepriaznivých vplyvov prostredia. Maximálna rýchlosť snímacieho pohybu je 4 m/s. Frekvencia snímaných dát je v rozsahu 10 Hz – 50 kHz [14].



Obr. 10 – Znáznornenie zapojenia laserového interferometra [14]

|  |  |         |
|--|--|---------|
|  | Ústav výrobných strojů, systémů a robotiky | Str. 21 |
|  | BAKALÁŘSKÁ PRÁCE                           |         |

## 2.3 UPEVNENIE AKCELEROMETROV

Snímač zrýchlenia sa upevňuje tak, aby smer merania a smer osi maximálnej citlivosti snímača bol totožný. Konkrétne miesto upevnenia je závislé od druhu merania, ktoré sa práve vykonáva. Pri meraní určitej časti stroja sa snímač aplikuje na povrch danej časti, v inom prípade môže nastať skreslené vyhodnotenie, ktoré vzniká rôznymi spojmi, uložením alebo pružnosťou materiálu. Najlepším spôsobom pripevnenia snímača je realizovaný pomocou šróbov na rovnom a hladkom povrchu s použitím tenkej vrstvy tvrdého spevňovacieho materiálu (napr. kyanoakryláty alebo veľmi často je využívaný včelí vosk). Použitie mäkkých spojovacích materiálov výrazne znižuje užitočný rozsah frekvencií použiteľných pre meranie. Kvalita pripevnenia spôsobuje, že rezonančná frekvencia sa nachádza veľmi blízko ideálnej rezonančnej frekvencii. Existujú aj iné druhy pripojenia, ale nie sú tak efektívne [11].

## 3 MERANIE VIBRÁCIÍ PRI OBRÁBANÍ

### 3.1 CIELE MERANIA VIBRÁCIÍ

Hlavným účelom zbierania dát z prebiehajúceho obrábacieho procesu je určenie stability obrábacieho stroja. Pri rôznych zaťažovacích testoch sa posudzuje presnosť obrábania, kvalita obrobeného povrchu, stupeň poškodenia obrábacieho nástroja a iných kritických súčastí (resp. ich životnosť) a celkovo samotný priebeh obrábania – amplitúdy výchyliek a miera periodického opakovania. Cieľom tejto práce bude zhodnotiť tieto vlastnosti na základe výstupnej závislosti zrýchlenia a frekvencie na čas.

### 3.2 OBJEKT ZVOLENÝ PRE EXPERIMENT

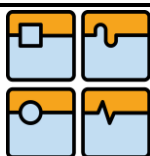
Všetky zaťažovacie testy budú vykonávané na CNC frézke MCV 754 QUICK od firmy Kovosvit MAS (Obr. 11). Obrábanie vykonáva nástroj Iscar HELIDO a rezný plátok H490 ANKX 120508PNTR. Zaťažovacie testy sa od bežného využitia líšia väčšou šírkou záberu hlavného ostria, vyššími otáčkami a posuvom. Aby bola zachovaná bezpečnosť, kritické hodnoty týchto veličín však nebudú prekročené.



Obr. 11 – CNC frézka MCV 754 QUICK [19]

### 3.3 PROSTRIEDKY NA ZISK ÚDAJOV

Analýza priebehu kmitania začína pri zostavení aparatury. K tomu aby sme mohli rozlíšiť intenzitu vibrácií, je potrebné správne zostaviť meraciu sústavu. V našom prípade je sústava tvorená piezoelektrickým akcelerometrom od firmy Kistler, ktorý získané údaje posielajú cez optické vlákno do zberného modulu značky National Instruments, kde sa impulzy prevedú a ďalej odošlú do počítača. Tento prenos ukončuje software, ktorý odoslané signály konvertuje a zaznamená do výstupnej charakteristiky závislej od času.



### 3.3.1 AKCELEROMETER KISTLER 8636C10

Na zachytávanie impulzov bude slúžiť piezoelektrický akcelerometer umiestnený v blízkosti rezného nástroja a v prípade aktívneho chladenia sa pre jeho ochranu pred kvapalinou umiestni na rameno s nástrojom zozadu obrábacieho stroja. K dispozícii máme keramický akcelerometer od spoločnosti Kistler typ 8636C10 využívajúci technológiu PiezoBEAM – vylepšenie reakcií pri širokom rozsahu frekvencií. Výrobca uvádza, že tento typ je vybavený vysokou citlivosťou, potláča vplyv termálne vzniknutých chýb a svojou nízkou impedanciou zabezpečuje použitie štandardného vodiča. Je aj pomerne ľahký, čo znamená, že nebude výrazne ovplyvňovať výsledky merania svojou hmotnosťou [15].



Obr. 12 – Akcelerometer Kistler typ 8636C10 [15]

Nasledujúca tabuľka zobrazuje jeho technické parametre čerpané z [15].

|                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| Hmotnosť                   | 5 g                   |
| Citlivosť                  | 500 mV/g $\pm$ 5%     |
| Priečna citlivosť          | 1%                    |
| Rozsah akcelerácie         | $\pm$ 10 g            |
| Odozva                     | 1 až 5000 Hz $\pm$ 5% |
| Rezonančná frekvencia      | 22 kHz                |
| Rozsah pracovných teplôt   | 0 až 65 °C            |
| Rozsah skladovacích teplôt | -25 až 95 °C          |

Výstupy:

|            |               |
|------------|---------------|
| Impedancia | <500 $\Omega$ |
| Napätie    | $\pm$ 5 V     |
| Prúd       | 2 mA          |

### 3.3.2 ZBERNÝ MODUL NI 9234

Zberný modul 9234 od firmy NI je štvor-kanálové zariadenie umožňujúce zhromaždenie signálov nazbieraných integrovanými piezoelektrickými senzormi a následný digitalizovaný export informácií do spárovaného softwaru. Zariadenie je vybavené i filtrami na vyhladzovanie hrán pre automatickú reguláciu miery vytvárania dát. Pripojenie k počítaču je riešené USB portom. Výrobca odporúča využitie produktu pre monitorovanie stavu priemyselných obrábacích strojov, meranie hluku vzniknutého vo vozidlách a testovanie drsností povrchov [16].





Obr. 13 – Zberný modul National Instruments 9234 [16]

Technické parametre použitého zberného modulu podľa zdroja [16]:

|                             |                    |
|-----------------------------|--------------------|
| Počet kanálov               | 4 analógové vstupy |
| Rozsah vstupných údajov     | $\pm 5\text{ V}$   |
| Rozlíšenie                  | 24 bit             |
| Dynamický rozsah            | 102 dB             |
| Max. vzorkovacia frekvencia | 51,2 kS/s          |
| Typ napájania               | USB                |

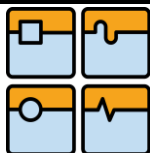
### 3.3.3 SOFTWARE NI LabVIEW SignalExpress

Záverečnú časť celej zostavenej meracej aparatury tvorí program NI LabVIEW SignalExpress, ktorým vykresľujeme priebeh merania. Tento program všeobecne slúži k zhromažďovaniu a analýze nameraných dát získaných akcelerometrami. Výsledky zaťažovacej skúšky sa dajú nielen graficky vykresliť ale aj exportovať do textového súboru pre ďalšie využitie [20].

## 3.4 SPRACOVANIE ZÍSKANÝCH INFORMÁCIÍ

So zostavenou aparaturou sa vykonáva 11 meraní na štyroch odlišných pozíciách obrábacieho stroja (viď obr. 14, 16, 18 a 20). Jednotlivé zaťažovacie skúšky sa líšia rôznou voľbou rezacích podmienok a to konkrétne otáčok za minútu a posuvu v milimetroch za minútu.

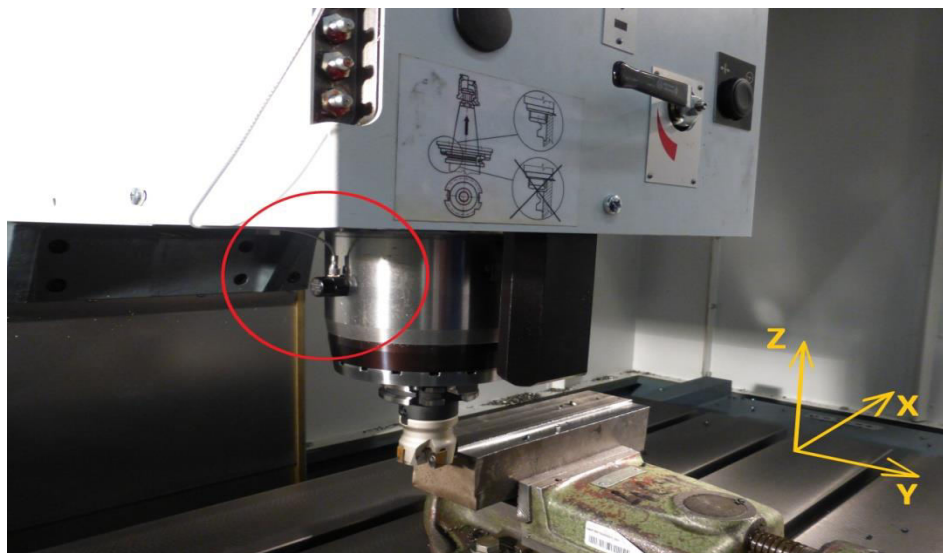




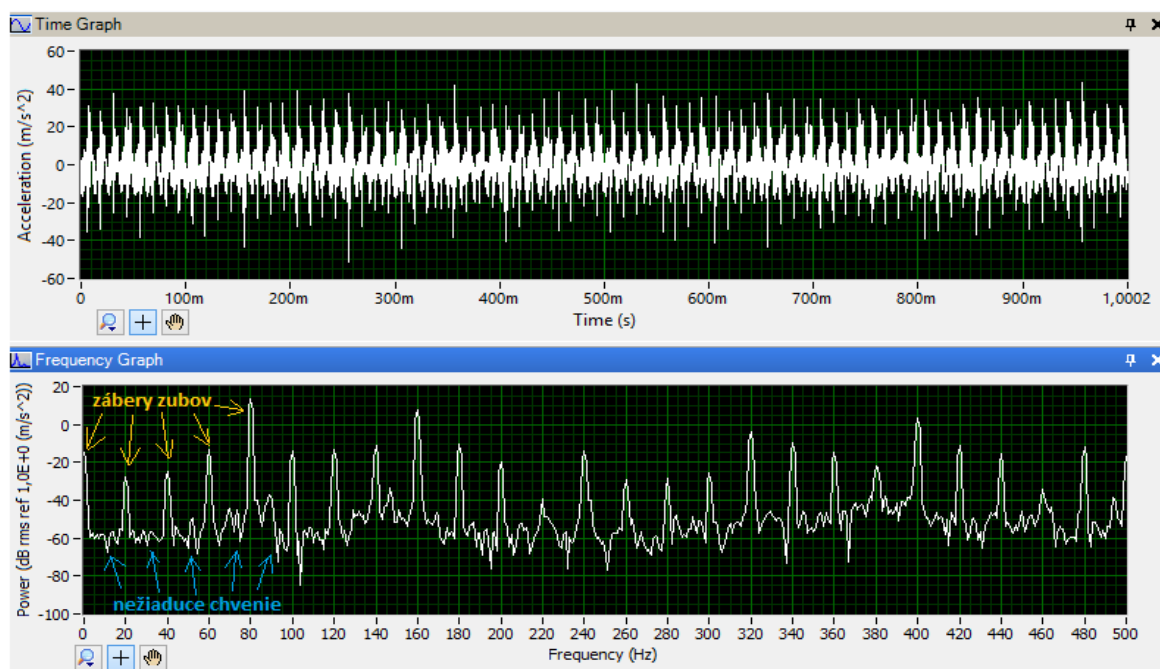
## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

## Prvé meranie

Os x, hĺbka záberu 3 mm, otáčky 1200/min, posuv 700 mm/min, chladienie neaktívne, umiestnenie vpredu



Obr. 14 – Prvá poloha akcelometra pri zaťažovacej skúške



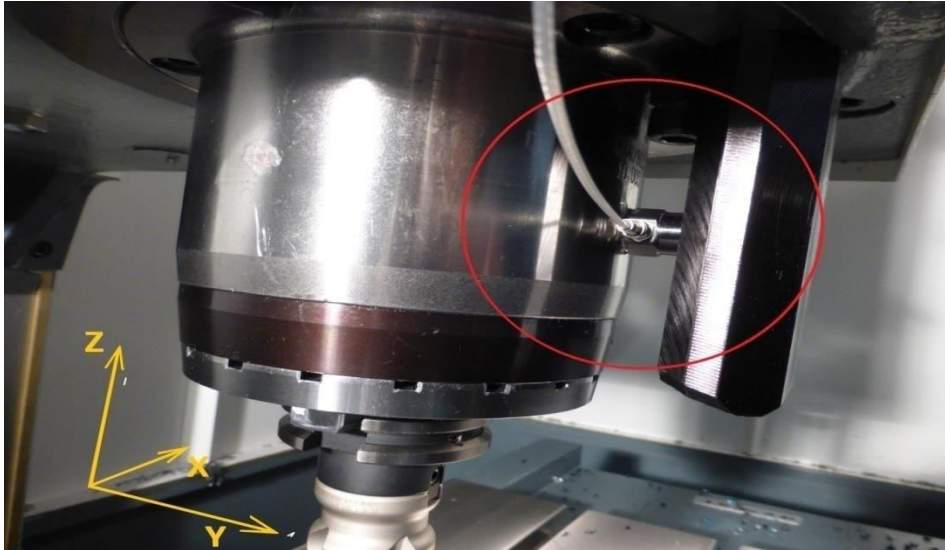
Obr. 15 – Priebeh prvej zaťažovacej skúšky

Priebeh prvého testu je veľmi pokojný. Ak prepočítame otáčky nástroja z minút na sekundy, zistíme, že amplitúdy, ktoré vidíme na obrázku 15, sa nachádzajú presne na frekvenciách, ktorých hodnoty sú násobkom týchto prepočítaných otáčok. Práve tieto amplitúdy vyjadrujú zaberanie zubov do materiálu. Intenzita nežiaducich vibrácií je zobrazovaná medzi nimi a v tomto prípade môžeme dôjsť k záveru, že nenaberajú takých hodnôt, ktoré by výrazne namáhali vreteno alebo deformaovali obrobený povrch.

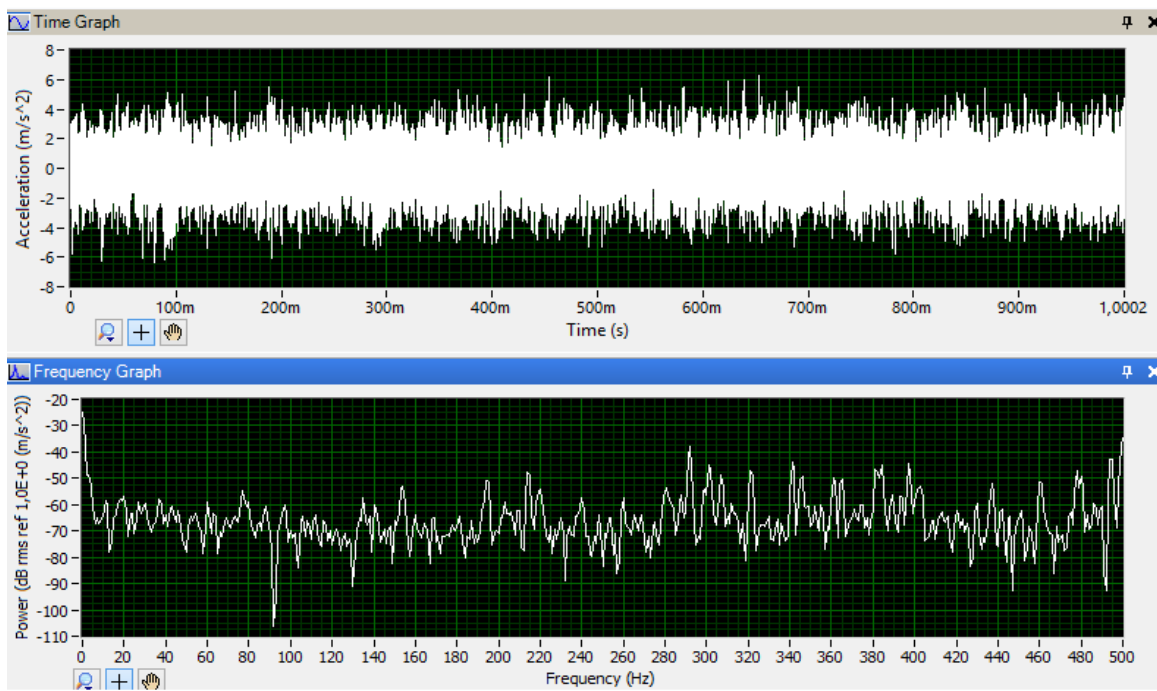


## Druhé meranie

Os y, hĺbka záberu 3 mm, otáčky 1200/min, posuv 700 mm/min, chladenie neaktívne, umiestnenie vpredku

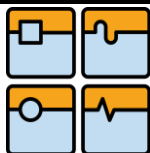


Obr. 16 – Druhá poloha akcelerometra pri zaťažovacej skúške



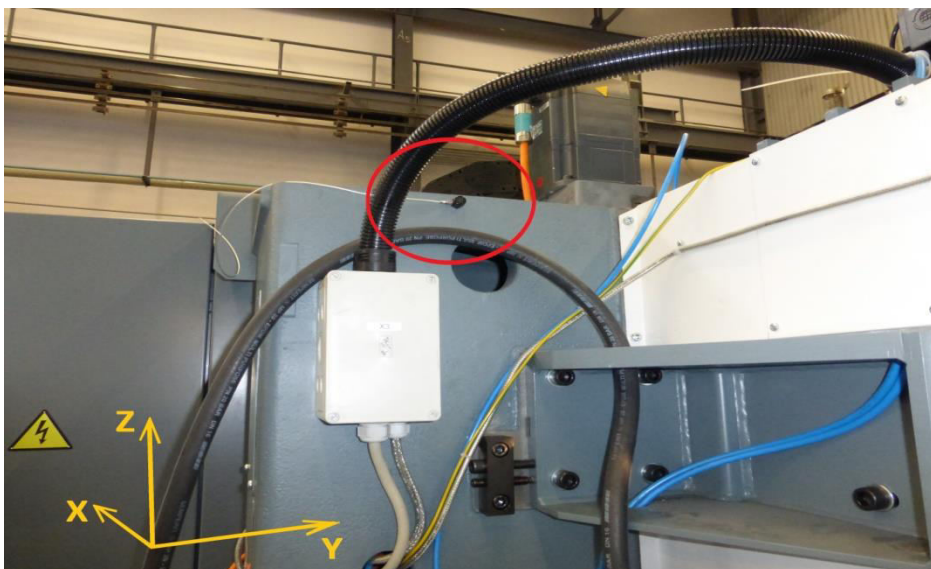
Obr. 17 – Priebeh druhej zaťažovacej skúšky

Za rovnakých podmienok prebehlo aj druhé meranie. Jeho priebeh naznačuje, že obrábací stroj má inú tuhosť v smere osi y. Odchýlky spôsobené zábermi zubov už nie sú tak rozdielne od vznikajúceho chvenia ako v prvom meraní. Ak porovnáme hodnotu zrýchlenia, ktoré opisuje priebeh, s prvou testovacou skúškou, usúdime, že má stroj v tomto smere po vychýlení z rovnovážnej polohy väčšiu stabilitu a udržiava si približne rovnakú veľkosť odchýlky počas celého obrábania.

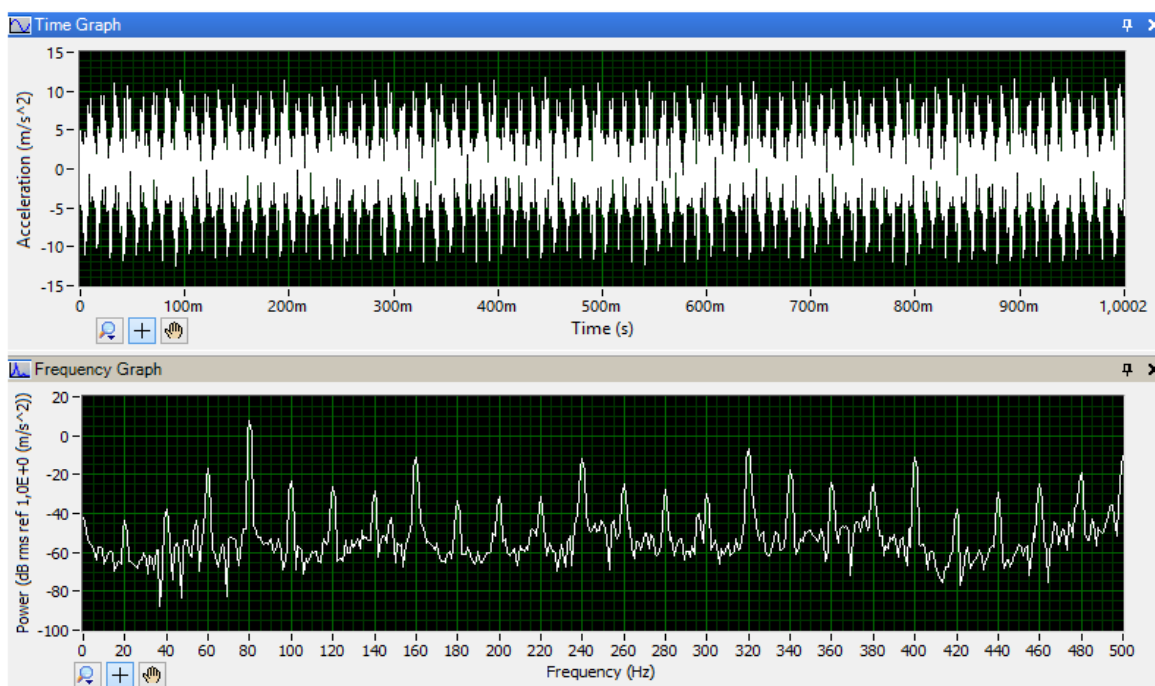


## Tretie meranie

Os x, hĺbka záberu 3 mm, otáčky 1200/min a posuv 900 mm/min, chladenie aktívne, umiestnenie vzadu



Obr. 18 – Tretia poloha akcelerometra pri zaťažovacej skúške



Obr. 19 – Priebeh tretej zaťažovacej skúšky

Tretia zaťažujúca skúška prebieha s vyšším posuvom, teda rýchlosťou odoberania materiálu za jednotku času. Opäť je viditeľný rozdiel medzi zábermi zubov a vytváraným chvením. Hodnoty frekvencie sú zhodné s prvou skúškou, ale hodnoty zrýchlenia sú menšie, čo je spôsobené vzdialenosťou od epicentra vzniku vibrácií.

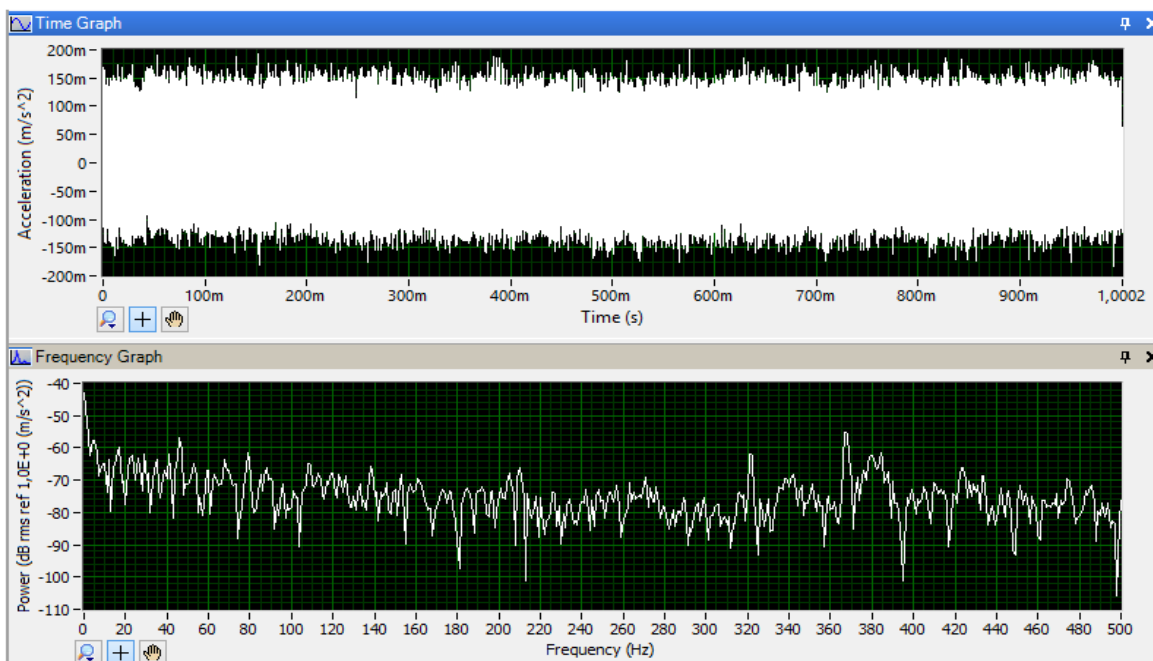


## Štvrté meranie

Os y, hĺbka záberu 3 mm, otáčky 1200/min a posuv 900 mm/min, chladienie aktívne, umiestnenie vzadu



Obr. 20 – Štvrtá poloha akcelerometra pri zaťažovacej skúške



Obr. 21 – Priebeh štvrtej zaťažovacej skúšky

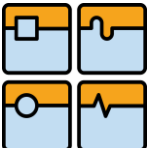
Posledná zaťažovacia skúška, ktorá je zaujímavá svojím priebehom, je rovnako ako druhá, vykonávaná v ose y. Obrábací proces je sprevádzaný výraznejším zvukovým rušením ako ostatné testy. V tomto prípade do obrábania nepriaznivo zasahujú i vibrácie s rušivým efektom zhoršujúce kvalitu povrchu a škodiace nástroju. Ich prítomnosť prudko zvyšuje hodnoty zrýchlenia až o niekoľko rádov v porovnaní s bežnými testami. Napriek tomu však obrábací stroj zvládol aj tento test a môžeme prehlásiť, že je vo veľmi dobrom stave.



## ZÁVER

V teoretickej časti tejto práce bolo náplňou vypracovanie rešerše na tému kmitanie obrábacích strojov a možnosti jeho merania. Po dôkladnom zbieraní a zjednotení informácií z viacerých dostupných zdrojov môžem prehlásiť túto úlohu za splnenú. Touto problematikou sa zaoberajú viaceré štúdie, preto zoskupenie všetkých informácií považujem pre mňa za určitý prínos hlavne v získaní nových poznatkov, ktoré môžem využiť v budúcnosti.

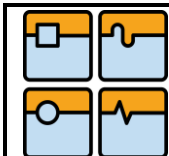
Praktická časť tejto práce pozostáva z úvodnej prípravy na meranie, ktoré pokračuje zhotovením meracej aparatury a samotnými zaťažovacími skúškami vykonávanými na obrábacom stroji. Celkovo bolo vykonaných 11 testov, ktoré sa líšili vo voľbe rezacích podmienok (otáčky nástroja a posuv) a v polohovaní akcelerometra, ktorý zachytával vibrácie. Z týchto testov som vybral 4 také, ktoré zastupujú všetky možné kombinácie, teda zmenu polohy a zmenu posuvu. Vhodnosť výberu práve týchto testov zaručuje aj možnosť vzájomného porovnania výsledkov. Zo závislostí zrýchlenia od frekvencie pri zaťažovacích skúškach 1 a 3, je zrejmé, ako zasahuje nástroj do materiálu. Tieto viditeľné rozdiely však chýbajú v druhej a štvrtej skúške, čo naznačuje, že v smere osi x a y sú rôzne tuhosti obrábacieho stroja. Skúšky č. 3 a 4 nám ukázali, že pri rovnakých podmienkach sa v smere osi y prejavujú oveľa intenzívnejšie vibrácie ako v smere osi x. Celý proces však zostal bez trvalých následkov, čo potvrdzuje dobrý stav obrábacieho stroja. Zhrnutie jednou vetou by teda vyjadrilo, že výsledky praktickej časti poukázali na to, že obrábací stroj je za stanovených podmienok stabilný. Ďalšie výsledky testovania som zverejnil v prílohách.

|  |  |         |
|--|--|---------|
|  | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky | Str. 30 |
|  | BAKALÁŘSKÁ PRÁCE                           |         |

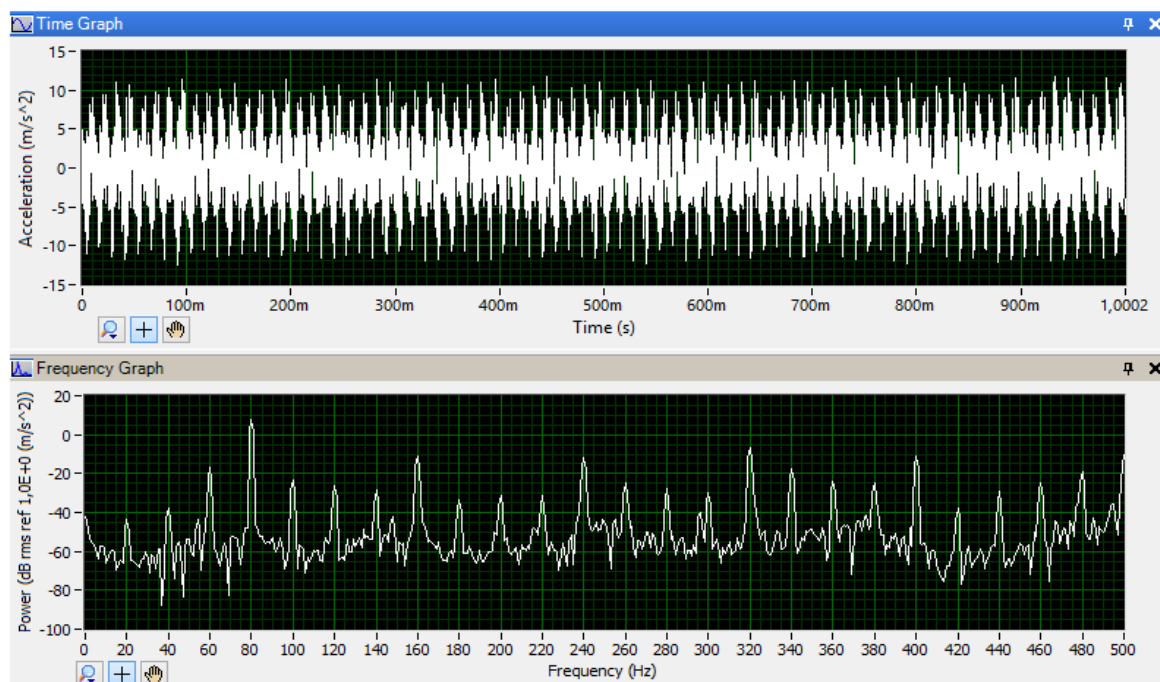
## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] TLUSTÝ, J. *Manufacturing Processes and Equipment*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. p. 928. ISBN 0-201-49865-0.
- [2] TATAR, K., GREN, P. Measurement of milling tool vibrations during cutting using laser vibrometry. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. Elsevier. March 2008. 48(3-4), 380-387 [cit. 13.5.2014]. Dostupné prostřednictvím Science Direct z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.09.009>.
- [3] ČEP, R. Přednáška 10. Kmitání při obrábění. In: <http://homel.vsb.cz/~cep77/> [online]. [cit. 23. 5. 2014]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~cep77/emo.htm>.
- [4] SCHAUER, P. Mechanické kmity. In: <http://fyzika.fce.vutbr.cz> [online]. 12/2010. [cit. 23. 5. 2014]. Dostupné z: <http://fyzika.fce.vutbr.cz/studium-vyuka-schauer>.
- [5] JURIGA J. *Virtuální model části obráběcího stroje v ADAMS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [6] MAREK, J., NOVOTNÝ, L., SMOLÍK, J., BLECHA P., BŘEZINA T., MRKVICA I., SULITKA M., et al. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. MM Speciál. Praha: MM publishing, s. r. o., 2006. 284 s. ISBN 12122572.
- [7] ŠIROKÁ, M. Měření a vyhodnocení vibrací on-line bezkontaktním způsobem pomocí laserinterferometru Renishaw. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2011. 99 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Vladimír Pata.
- [8] DIBLÍK, J. *Měření vibrací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Viera Biolková.
- [9] GAUTSCHI, G. *Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers*. 1st ed. Berlin: Springer, 2010. p. 264. ISBN 978-3-642-07600-8.
- [10] KOVÁČ, M. *Měření a analýza vibrací elektrického stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vítek. Ph.D.
- [11] BRÜEL & KJÆR, Measuring Vibration. [online]. 1982. [cit. 14. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/br0094.pdf>.
- [12] BRÜEL & KJÆR, Mechanical Vibration and Shock Measurements. [online]. 1984. [cit. 14. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/doc/bn1330.pdf>.

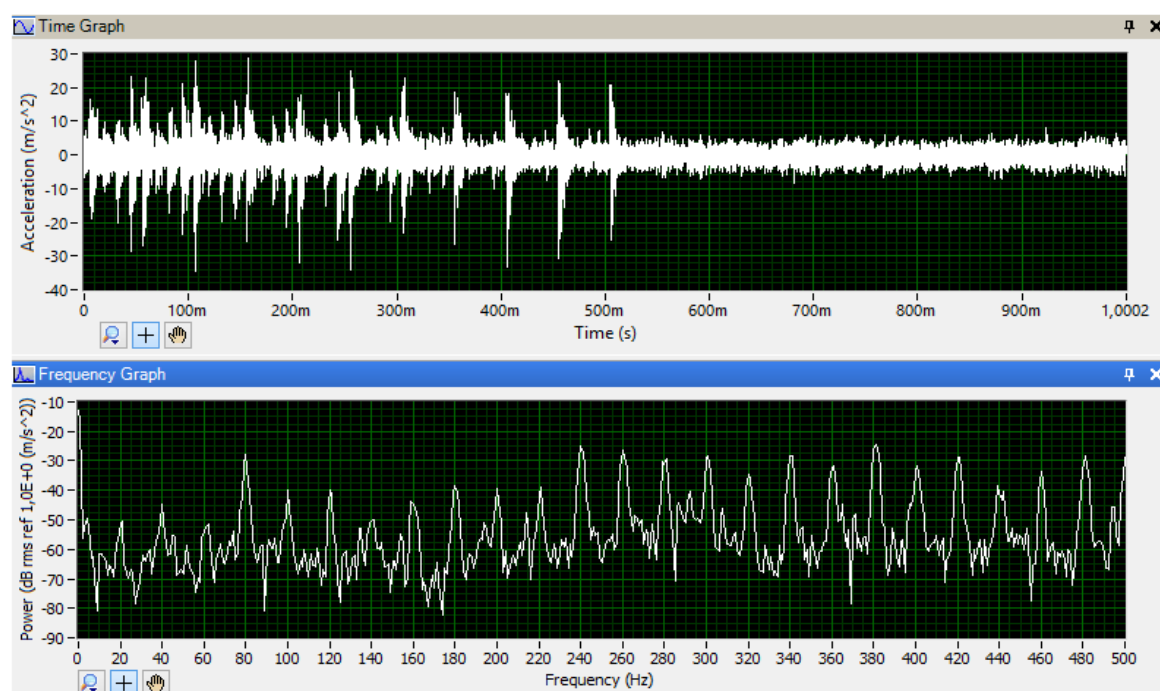
- [13] KREIDL, M., ŠMÍD, R. *Technická Diagnostika*. Senzory, metody, analýza signálu. 4. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 406 s. ISBN 8073001586.
- [14] RENISHAW, a. s. [online]. [cit. 23. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/laserovy-merici-system-xl-80--8267>
- [15] KISTLER, 8630C & 8636C PiezoBEAM ACCELEROMETERS.[online]. [cit. 17.5.2014]. Dostupné z: [www.intertechnology.com/Kistler/pdfs/Accelerometer\\_Model\\_8630C\\_8636C.pdf](http://www.intertechnology.com/Kistler/pdfs/Accelerometer_Model_8630C_8636C.pdf)
- [16] NATIONAL INSTRUMENTS, a. s. [online]. [cit. 23. 5. 2014]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-316/lang/cs>
- [17] AVITABILE, P. Experimental modal analysis. [online]. 2002. [cit. 26. 5. 2014]. Dostupné z: [http://macl.caeds.eng.uml.edu/umlspace/Modal\\_Space\\_Articles\\_122909\\_MACL.pdf](http://macl.caeds.eng.uml.edu/umlspace/Modal_Space_Articles_122909_MACL.pdf).
- [18] TŮMA, J. Experimentální modální analýza - Teorie. [online]. [cit. 26. 5. 2014]. Dostupné z: [http://www.kme.zcu.cz/jkana/soubory/Tuma\\_Modalni\\_analyza\\_teorie.pdf](http://www.kme.zcu.cz/jkana/soubory/Tuma_Modalni_analyza_teorie.pdf).
- [19] KOVOSVIT MAS, a. s. [online]. [cit. 23. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.kovosvit.cz/cz/produkty/technologie-frezovani/vertikalni-obrabeci-centra/mcv-754-quick>
- [20] NATIONAL INSTRUMENTS, LabVIEW. [online]. 2013. [cit. 23. 5. 2014]. Dostupné z: <http://www.ni.com/labview/signalexpress/>



## PRÍLOHA – UKÁŽKY ĎALŠÍCH MERANÍ

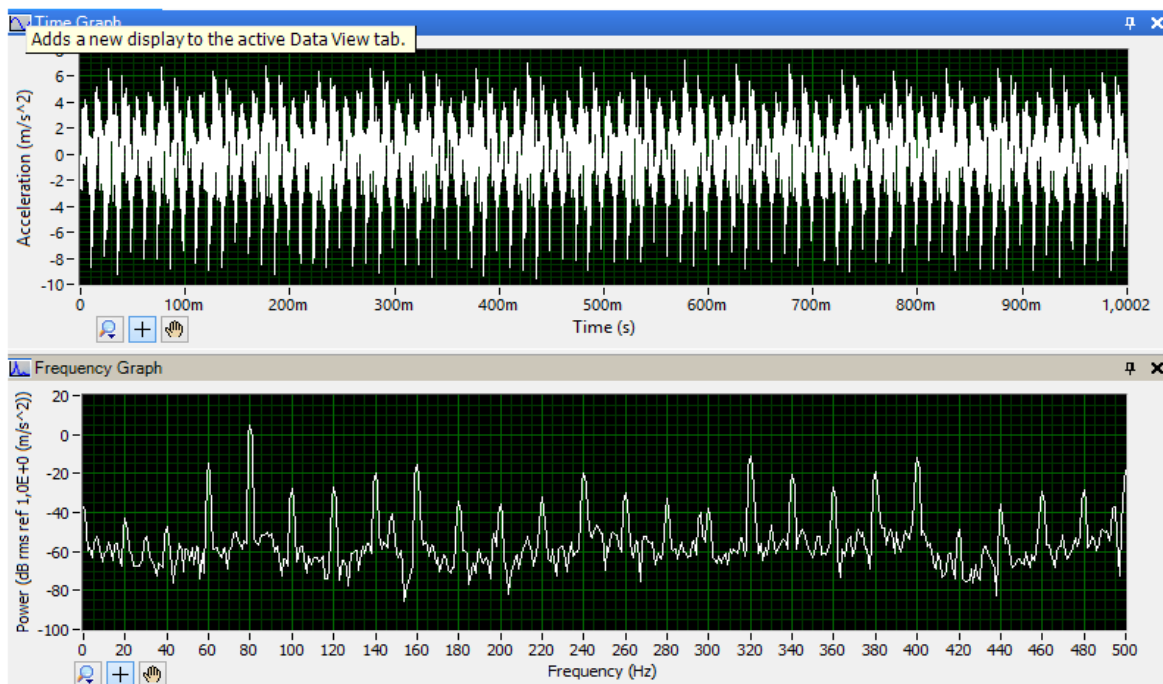
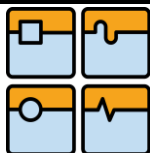


Obr. 22 – os x, hlĺbka záberu 3 mm, otáčky 1200/min, posuv 500 mm/min, chladienie neaktívne, umiestnenie vpredu

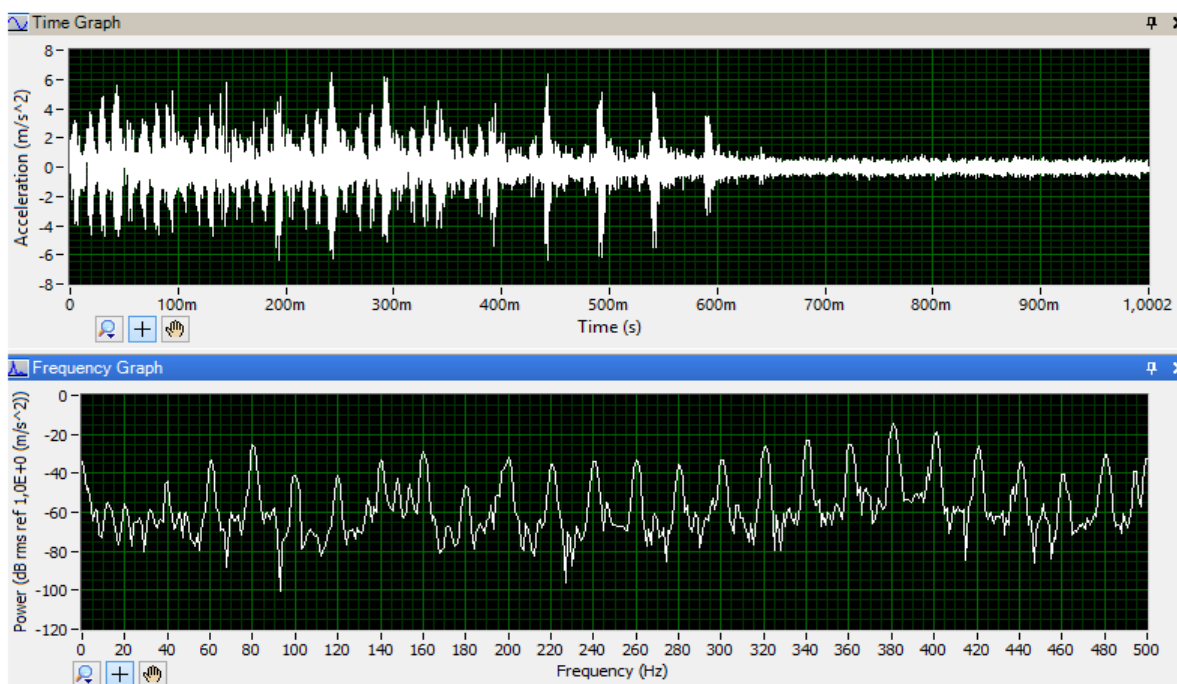


Obr. 23 – os y, hlĺbka záberu 3 mm, otáčky 1200/min, posuv 500 mm/min, chladienie neaktívne, umiestnenie vpredu





Obr. 24 – os x, hlĺba zĺberu 3 mm, otĺčky 1200/min, posuv 500 mm/min, chladienie aktĺvne, umiestnenie vzadu



Obr. 25 – os y, hlĺba zĺberu 3 mm, otĺčky 1200/min, posuv 500 mm/min, chladienie aktĺvne, umiestnenie vzadu